

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование структуры и механических свойств сварных соединений сплава ВТ6, полученных лазерной сваркой

УДК 621.791.1:669.295.5

#### Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б61	Насоновская Альбина Владимировна		

#### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Овечкин Б.Б.	к.т.н.		

#### Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный Сотрудник ИФПМ СО РАН	Почивалов Юрий Иванович	к.ф. –м.н., в.н.с.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кашук И.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Черемискина М.С.	-		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Овечкин Б.Б.	к.т.н., доцент		

Томск – 2020 г

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01*

Код результата	<b>Результат обучения</b> (выпускник должен быть готов)
P1	Применять основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социально-общественных и профессиональных задач, способность анализировать социально-значимые проблемы и процессы.
P2	Демонстрировать понимание сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения коммуникативных задач современных технических средств и информационных технологий.
P3	Самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля, осознавать перспективность интеллектуального, культурного, нравственного, физического и профессионального саморазвития и самосовершенствования, уметь критически оценивать свои достоинства и недостатки.
P4	Демонстрировать знание правовых, социальных, экологических и культурных аспектов комплексной инженерной деятельности, осведомленность в вопросах охраны здоровья, использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически и технически безопасное производство.
P5	Эффективно работать в кооперации с коллегами, находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях и готовность нести за них ответственность.
P6	Умение выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учетом требований технологичности, экономичности, надежности и долговечности, экологических последствий их применения.
P7	Умение использовать принципы и методики комплексных исследований, испытаний и диагностики, обработки и модификации материалов, изделий и процессов их производства, включая стандартные и сертификационные испытания.
P8	Умение применять основы высокотехнологичного инновационного менеджмента, в том числе малого бизнеса, владеть навыками в организации и техническом оснащении рабочих мест; разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, оценке рисков и определении мер по обеспечению экологической и технической безопасности разрабатываемых материалов, техники и технологий.
P9	Умение применять современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской и расчетно-аналитической деятельности в области материаловедения и технологии материалов.
P10	Умение использовать на практике современные представления наук о материалах, взаимодействии материалов с окружающей средой, владение навыками сбора данных, изучения, анализа и обобщения научно-технической информации по тематике исследования, разработки и использования технической документации.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_ Б.Б. Овечкин  
(Подпись) (Дата)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
4Б61	Насоновской Альбине Владимировне

Тема работы:

Исследование структуры и механических свойств сварных соединений сплава ВТ6, полученных лазерной сваркой	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 52-51/с от 21.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Образцы титанового сплава ВТ6 в состоянии поставки.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Изучение литературы, подбор материалов для исследований, изготовление образцов; Микроструктурное исследование сварного соединения титанового сплава ВТ6 в исходном состоянии, после УУО, УУО в сочетании с ЭПД и наномодифицирования; Определение механических свойств (предел прочности, предел текучести) исследуемых материалов;

	Анализ изломов и характера разрушения образцов после испытаний на растяжение; Электронно-микроскопические исследования образцов.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент...	И.В. Кацук, доцент ОСТН ШБИП
Социальная ответственность	М.С. Черемискина, ассистент ООД ШБИП

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Овечкин Б.Б.	К.Т.Н.		

**Консультант**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный Сотрудник ИФПМ СО РАН	Почивалов Юрий Иванович	к.ф. –м.н., в.н.с.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б61	Насоновская Альбина Владимировна		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
 Уровень образования Бакалавриат  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения  
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2019 /2020 учебного года

Форма представления работы:

<b>Бакалаврская работа</b>
----------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.03.2020	Литературный обзор	20
11.05.2020	Проведение исследований	30
25.05.2020	Выводы	15
29.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
29.05.2020	Социальная ответственность	10
02.06.2020	Обсуждение результатов заключение	15

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Овечкин Б.Б.	К.Т.Н.		

**Консультант**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Почивалов Юрий Иванович	к.ф.-м.н., в.н.с.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Овечкин Б.Б.	к.т.н., доцент		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 93 страницы, 21 рисунок, 23 таблицы, 38 источников.

Ключевые слова: титановые сплавы, лазерная сварка, ультразвуковая обработка, электропластическая деформация, модифицирование нанопорошками карбонитрид титана (TiCN).

Объектом исследования является титановый сплав ВТ6.

Цель работы – Исследование структуры и механических свойств сварных соединений сплава ВТ6, полученных лазерной сваркой.

В данной работе проводились изучение литературы и подбор материалов для исследования, подготовка образцов титанового сплава ВТ6 без финишной обработки, с УУО, с УУО+ЭПД и образцов модифицированных нанопорошками карбонитрид титана (TiCN). к исследованиям, изучение микроструктуры, испытания на растяжение, на усталостную долговечность, был проведён анализ изломов при помощи растрового электронного микроскопа, а также электронно-микроскопические исследования сварного шва, полученного методом лазерной сварки.

В результате исследования были изучены механические и структурные свойства сварного соединения, полученного методом лазерной сварки, было полноценно установлено влияние УУО на сварное соединение титанового сплава ВТ6. А также были подведены некоторые выводы по влиянию на сварное соединение УУО+ЭПД и наномодифицирования.

Область применения: титановый сплав ВТ6 используется в авиакосмической промышленности.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в применении технологии ультразвуковой обработки как наиболее энергосберегающей технологии.

В будущем планируется более подробное исследование влияния ультразвуковой ударной обработки в сочетании с электропластической

деформацией, и влияние модифицирования нанопорошками карбонитрид титана (TiCN). на сварное соединение титанового сплава ВТ6.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ И НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

**УУО** – ультразвуковая ударная обработка

**ЭПД** – электропластическая деформация

**УУО+ЭПД** – ультразвуковая обработка в сочетании с  
электропластической деформацией

**СШ** – сварной шов

**ЗТВ** – зона термического воздействия

**ОМ** – основной материал



## Содержание

Введение .....	12
1. Литературный обзор.....	14
1.1 Материал исследования .....	14
1.2 Сварка титановых сплавов .....	16
1.2.1 Аргонодуговая сварка.....	17
1.2.2 Лазерная сварка.....	19
1.3 Фазовые превращения в титане и в сварном шве титанового сплава.....	23
1.4 Методы повышения усталостной долговечности сварных соединений.	26
1.4.1 Ультразвуковая ударная обработка .....	26
1.4.2 Электропластическая деформация металлов .....	28
1.4.3 Модифицирование сварного шва нанодисперсными тугоплавкими частицами.....	28
2. Материалы и методы исследования .....	30
2.1. Материал исследования .....	30
2.2. Методы исследования .....	32
2.2.1. Оптическая микроскопия .....	32
2.2.2. Электронная микроскопия .....	33
2.2.3. Исследование твёрдости.....	33
2.2.3. Механические испытания.....	35
3. Результаты исследований.....	36
3.1 Металлографические исследования .....	36
3.2 Механические свойства при растяжении .....	43
3.3 Фрактография .....	48
3.4 Электронная микроскопия .....	50

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ» .....	52
4. Финансовый менеджмент .....	53
4.1 Анализ конкурентных технических решений .....	53
4.2 SWOT-анализ .....	56
4.3 Планирование научно-исследовательских работ .....	58
4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	58
4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....	59
4.3.3 Разработка графика проведения исследования .....	60
4.4 Бюджет научного исследования .....	65
4.4.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов) .....	65
4.4.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ .....	66
4.4.3 Расчет амортизации специального оборудования .....	66
4.4.4 Основная заработная плата .....	68
4.4.5 Дополнительная заработная плата .....	69
4.4.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	70
4.4.7 Накладные расходы .....	70
4.5 Определение ресурсоэффективности исследования .....	71
4.5.1 Интегральный показатель финансовой эффективности .....	71
4.5.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности .....	71
4.5.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки .....	73
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ» .....	75
5. Социальная ответственность .....	76

Введение .....	76
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения .....	76
5.1.1 Специальные, характерные для рабочей зоны исследователя, правовые нормы трудового законодательства .....	76
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	78
5.2 Производственная безопасность.....	79
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	79
5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	81
5.3 Экологическая безопасность .....	83
5.3.1 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду .....	83
5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды .....	84
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях(ЧС).....	84
5.4.1 Анализ вероятных ЧС , которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	84
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий в случае возникновения ЧС .....	86
Вывод по разделу .....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	88
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	90

## **Введение**

Актуальной задачей в машиностроении является повышение качества выпускаемой продукции. Важную роль в решение этой задачи играет изучение металлов и сплавов при исследовании поведения изделий в процессе их эксплуатации, а также в разработке требований к технологии и оборудованию при создании новых производств и реконструкции действующих.

В современном мире машиностроения большой спрос имеет лазерная сварка титановых сплавов, так как этот метод эффективен в улучшении качества и снижении производственных затрат.

Тем не менее, использование одной лазерной сварки приводит к ряду проблем, так как практически невозможно достичь качественного сварного соединения, которое получится структурно и химически однородное и без дефектов. Лазерная сварка состоит из нескольких жёстких термических циклов, что может привести к потере технологической прочности и пластичности соединения, это тоже становится проблемой при получении качественного сварного соединения.

Постоянное повышение требований к металлопродукции, вызывает необходимость поиска новых технологических воздействий и термомеханических обработок, обеспечивающих формирование заданной структуры и свойств.

Качество изделий зависит от всего технологического процесса их изготовления. Особенную роль при формировании параметров изделий играют финишные операции. Высокопроизводительные операции на заключительной стадии обработки могут подавлять неблагоприятные наследственные признаки и способствовать улучшению качества деталей.

Целью данной работы являлось найти пути решения данных проблем, а именно найти такие финишные операции обработки сварного соединения титанового сплава, полученного методом лазерной сварки, которые будут способствовать улучшению структуры и повышению механических свойств и

изучение литературных материалов о титановом сплаве современного авиастроения ВТ6, а также о методах сварки титанового сплава данного типа, о фазовых превращениях, происходящих в сварном шве титанового сплава.

Основные задачи: изучение литературы, изготовление образцов, микроструктурное исследование образцов титанового сплава ВТ6, определение механических свойств, анализ изломов и характера разрушения образцов с различными видами финишных обработок, электронно-микроскопические исследования.

## 1. Литературный обзор

### 1.1 Материал исследования

Титан материал, который обладает двумя низкотемпературными модификациями –  $\alpha$ , которая может существовать до 1155K и имеет гексагональную кристаллическую решетку с плотной упаковкой атомов, и высокотемпературная –  $\beta$ , существующую при температурах выше 1155K. Высокотемпературная модификация титана имеет кубическую объемно-центрированную структурную решетку [1].

Основной классификацией титановых сплавов является классификация по структуре в нормированном состоянии:

- $\alpha$  – титановые сплавы, структура которых представлена  $\alpha$ -фазой;
- $\alpha+\beta$  – сплавы, структура которых представлена  $\alpha$  и  $\beta$  – фазами;
- $\beta$  – сплавы, структура которых представлена стабильной  $\beta$ -фазой.

Кроме того, согласно источнику [1], в основном принято различать два переходных класса титановых сплавов, такие как псевдо- $\alpha$ -сплавы, структура которых представляет собой  $\alpha$ -фазу и небольшое количество  $\beta$ -фазы (не более 5%), и псевдо- $\beta$ -сплавы, структура которых после нормализации является метастабильной  $\beta$ -фазой, но по свойствам они ближе к  $(\alpha+\beta)$ -сплавам с большим количеством  $\beta$ -фазы.

Сегодня титан считается одним из самых важных конструкционных металлических материалов. На данный момент титан считается одним из самых перспективных и вечных металлов, но признание к нему пришло только через путь длиной в 200 лет, раньше его считали непригодными для использования в конструкционных целях [1].

Настоящие исследования выполнены на сварочном сплаве титана ВТ6. Этот сплав пользуется спросом в изготовлении сварных и сборных авиационных конструкций больших размеров, его применяют в изготовлении баллонов, работающих под внутренним давлением в широком диапазоне температур от 196 до 450 ° C, и многих других конструктивных элементов.

Сплав ВТ6 относится к высокопрочным титановым сплавам мартенситного класса с пределом прочности  $\sigma_B > 1000$  Мпа. Высокая прочность достигается упрочняющей термообработкой. Так же данный сплав наряду с высокой прочностью обладает хорошую технологическую пластичность даже в горячем состоянии, данная способность позволяет получать различные полуфабрикаты: листы, прутки, плиты, поковки, штамповки, профили и другие.

Высокая коррозионная стойкость во многих агрессивных средах, таких как морская вода, влажная атмосфера и другие, является одним из основных преимуществ титанового сплава ВТ6, благодаря которому этот материал пользуется таким большим спросом.

Сплавы ВТ6 ( $\alpha+\beta$ )-класса являются наиболее распространенными за рубежом среди титановых сплавов. Сплав ВТ6 относится к двухфазным сплавам мартенситного и переходного типов.

Титановый сплав ВТ6 пользуется огромным спросом благодаря успешному легированию. Одним из важных легирующих элементов является алюминий, который повышает прочностные и термостойкие свойства, а также ванадий - один из немногих легирующих элементов в титане, который повышает не только прочностные свойства, но и пластичность. Благодаря легирующим элементам ВТ6 обладает низкой чувствительностью к водороду, минимальной склонностью к солевой коррозии и хорошей обрабатываемостью.

Благодаря тому, что титановый сплав ВТ6 хорошо деформируется в горячем состоянии, его возможно сваривать всеми традиционными видами сварки.

## 1.2 Сварка титановых сплавов

Сварка титановых сплавов всё чаще применяется в промышленности из-за особенностей физико-химических свойств титановых сплавов. Титановые сплавы имеют низкую склонность к образованию горячих трещин и небольшой линейной усадке. Также, титан и его сплавы обладают хорошей свариваемостью, являются парамагнитными и обладают некоторыми другими свойствами, которое занимают важное значение в машиностроении [2].

Основным недостатком сварки титановых сплавов является их высокая химическая активность в отношении таких вредных примесей, как азот, водород, кислород и углерод, что приводит к затруднению сварочного процесса. Из-за данной особенности, к данным сплавам нельзя применять дуговую сварку с использованием флюсов и покрытий, которые содержат оксиды и другие элементы, способные сильно загрязнить шов.

Так же к особенностям титанового сплава относятся низкая теплопроводность, высокое электросопротивление и температура плавления, тенденция к росту зёрен в околошовной зоне. Все эти свойства титана и его сплавов подразумевают особый подход к процессу сварки данных материалов, следует тщательно подбирать особые индивидуальные параметры сварки.

Одним из важных и обязательных критериев для получения качественного сварного соединения является двусторонняя защита от взаимодействия с воздухом и вредными примесями не только сварочной ванны, но и нагретого выше 600°C основного металла и металла шва.

Из-за основного недостатка титановых сплавов, которым является большая склонность к поглощению газов и высокая активность при взаимодействии со всеми формовочными материалами, их сплавление осуществляется в вакууме или нейтральной газовой среде.

Основные виды сварки плавлением, применяемые для получения сварных соединений титана и его сплавов – это дуговая сварка неплавящимися



и плавящимися электродами в среде инертных газов, сварка сжатой дугой, в том числе микроплазменная, электрошлаковая, электронно-лучевая и лазерная сварка.

При сварке титанов всегда меняется химический и фазовый состав металла в зоне сварки, а соответственно меняются и физико-механические свойства сварного соединения в разных участках.

Главным условие для качественной сварки титана является необходимость надёжной защиты зоны плавления. Предел прочности сварного соединения титана и титановых сплавов в зависимости от степени легирования и способа сварки плавлением составляет 0,6-0,8 от прочности основного металла.

Для двухкомпонентного мартенситного сплава ВТ6 сварочный процесс требует особого внимания при создании сварного шва с определёнными заданными физико-механическими свойствами и химическим составом.

Для получения сварных швов, сходных по свойствам с основным металлом, используют легированную проволоку, содержащую большое количество как  $\alpha$  -, так и  $\beta$ -стабилизирующих элементов.

Несмотря на неоднородность структуры, рассматриваемый сплав обладает удовлетворительной свариваемостью при всех видах сварки, применяемых для титана.

### **1.2.1 Аргонодуговая сварка**

Для титана и его сплавов наиболее широко применяемым является универсальный способ сварки плавлением - в среде аргона неплавящимся электродом. Аргонодуговая сварка – дуговая сварка в среде защитного газа, а именно аргона.

Аргонодуговая сварка выполняется на постоянном токе прямой полярности. Электроды используются вольфрамовые. Подача присадочного прута происходит непрерывно. Аргон подаётся при помощи горелки.

Титан является металлом, который достаточно быстро окисляется, предохранение от этого лицевой стороны обеспечивается газовой струёй, а чтобы защитить тыльную сторону используются накладки из меди или стали, в которых можно вырезать отверстия для подачи газа. Сложные образцы свариваются в специальных камерах, в полуавтоматическом режиме. В закрытом объёме можно контролировать и поддерживать газовую среду на необходимом уровне. Рабочие камеры предварительно вакуумируются, после чего заполняются аргоном [3].

Перед началом операции стоит убедиться в качестве очистки кромок. Данный сварочный процесс заключается в расплавление кромок свариваемого металла и присадочного материала под действием дуги. При этом дуга, сварочная ванна, конец проволоки и края металла защищены аргоном от воздействия окружающей среды. Варить титан необходимо на короткой дуге, без колебательных движений. После гашения дуги подачу газа следует продолжать в течение минуты для остывания металла, данное действие предотвратит окисление сварного шва.

Преимущества аргонодуговой сварки:

- высокое качество сварного соединения;
- возможно сваривание деталей небольшой толщины, так как работа ведётся на малых токах, а, следовательно, вероятность прожога практически невозможна;
- возможность наращивания объёма детали на дефектных участках;
- получение шва с любыми параметрами, что позволяет соединять как крупногабаритные образцы, так и мелкие.

Недостатки аргонодуговой сварки:

- невозможность выполнения работы на открытом воздухе, так как газовая защита на открытом воздухе неустойчива;

- ультрафиолетовое излучение.

Данный метод обеспечивает качество и надёжность сварных соединений, а также равномерность проплавки соединяемых частей.

### **1.2.2 Лазерная сварка**

В настоящее время довольно большое преимущество имеет сварка титановых сплавов при помощи лазерных технологий, связано это с мобильностью данного метода и получением меньшего количества дефектов.

В данном источнике [4] можно найти простое, но понятное понятие лазерной сварки. Данный вид сварки характеризуется, как технологический процесс получения неразъёмного соединения деталей изделия путём локальных плавки металлов на смежных поверхностях. В результате плавления и кристаллизации образуется прочная связь.

Суть лазерной сварки состоит в том, что излучение, проходя через фокусирующую систему, концентрируется в определённой точке, в месте концентрации луча металл быстро расплавляется. Для формирования сварного шва достаточно убрать лазер или расфокусировать его. Благодаря маленькой области термического воздействия в свариваемом материале практически отсутствует деформация, сварной шов получается тонким и не требует дальнейшей обработки.

Широкий диапазон режимов лазерной сварки даёт возможность проводить сварку материалов с различной толщиной, которая может быть, как несколько микрон, так и несколько десятков миллиметров, а также благодаря этому возможно реализовать принципиально различные механизмы проплавления. На лазерный луч не влияют магнитные поля свариваемых деталей и оборудования, что позволяет лучше формировать сварной шов по всей длине.

Лазерное сварочное оборудование бывает с твердотельным лазером, газовым.

Из твердотельных лазеров применяют лазеры на рубине. В твердотельном приборе (рисунок 1) основным элементом является стержень, изготовленный из рубина, стержень находится в осветительной камере. Когда в камеру с определенной частотой подаётся свет большой мощности, в кристалле происходит возбуждение атомов, это и приводит к излучению света одной длинной волны. Торцы стержня представляют собой отражающие зеркала, одно из них частично прозрачное, через него происходит выход энергии в виде лазерного излучения.

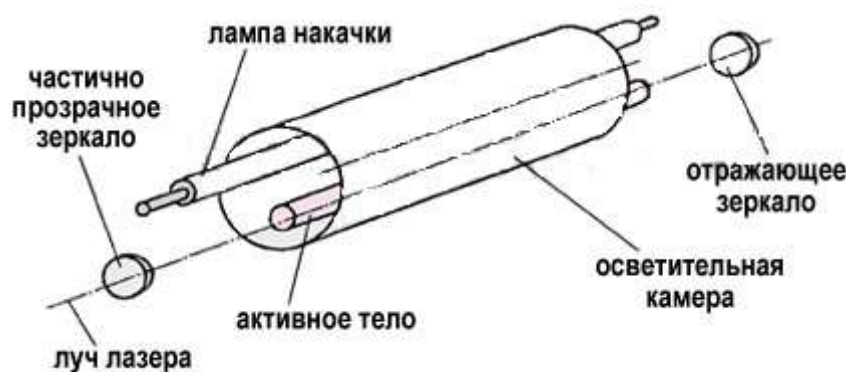


Рисунок 1- Схема твердотельного прибора

Твердотельные приборы имеют относительно небольшую мощность и применяются в основном в микроэлектронике, приборостроении и ювелирном деле, где приходится сваривать мелкие элементы. Используется как точечная сварка.

Газовые лазеры, использующие в качестве активной среды углекислый газ, представляют собой большую перспективу лазерной сварки.

Газовая смесь из баллонов с помощью насоса продувается через газоразрядную трубку (рисунок 2), где с помощью электрических разрядов происходит возбуждение газа. Газоразрядная труба имеет отражающее и прозрачное зеркало по торцам, весь процесс происходит, как в твердотельном лазере.

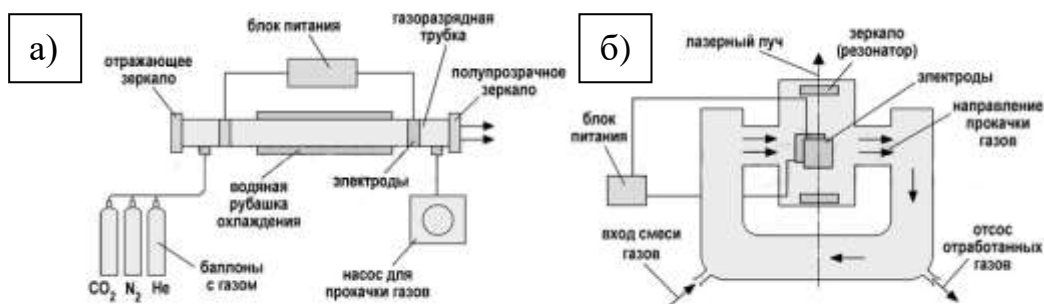


Рисунок 2- Схема газового лазера: а)- с продольной прокачкой газа, б) – с поперечной прокачкой газа

В источнике [4] говорится о том, что газовые лазеры способны развивать среднюю мощность от нескольких сотен watt до десятков киловатт в непрерывном и импульсно-периодическом режимах генерации излучения. Сварочные аппараты с газовым лазером имеют возможность варить толстый металл до 2 см со скоростью 1м/мин.

Самыми мощными считаются газодинамические лазерные устройства (рисунок 3). Активным телом является окись углерода, нагретая до 3000 °K и пропущенная через сопло Лавала. На выходе из сопла происходит резкое падение давления и, соответственно, охлаждение газа. Молекулы окиси углерода испускают монохромное излучение.

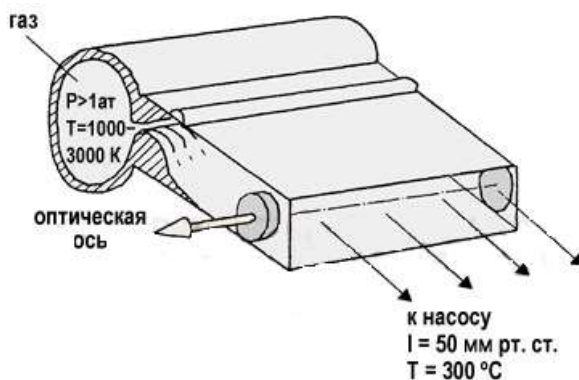


Рисунок 3- Схема газодинамического лазерного устройства

Данный способ позволяет развивать мощность до 100 кВт, что позволяет варить металлы с толщиной 35 мм со скоростью 200 м/час.

Лазерно-дуговая технология (рисунок 4) позволяет объединить в одном процессе лазер и дугу. Сочетание двух способов сварки приводит к объединению их преимуществ и устранению недостатков.

Технология данного метода сварки заключается в воздействии на поверхность дуги, которая способна переносить в расплавленный металл дополнительный материал. При это образуется достаточно широкий шов, который заполняет зазоры. Достоинством этого вида свирки является возможность влиять на металлургические свойства и адгезию сварочного шва к поверхностям заготовок.

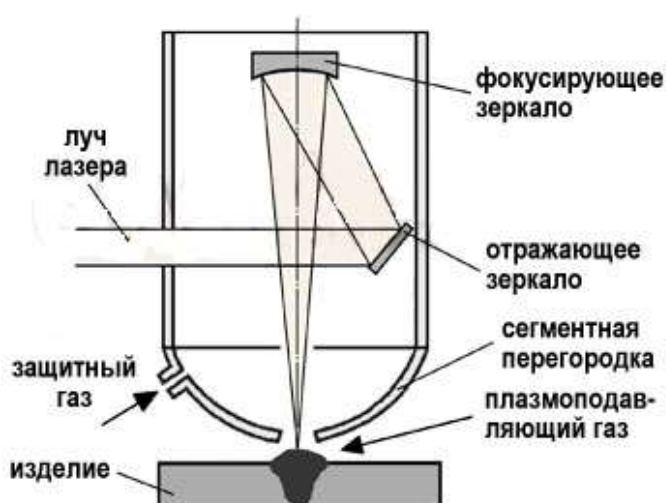


Рисунок 4- Схема лазерно-дуговой технологии сварки

Преимуществом лазерной сварки является уменьшение тепловой деформации до такого значения, которого невозможно достичь при дуговой сварки. Так же данный вид сварки обеспечивает большую глубину проникновения и высокую скорость, снижая при этом подводимую энергию.

Сварочная ванна быстро разогревается лазером, благодаря этому улучшается качество шва, его глубина. Это уменьшает напряжения и деформации от возникновения соединительного шва.

### 1.3 Фазовые превращения в титане и в сварном шве титанового сплава

Согласно источнику [5] отличительной особенностью титана и его сплавов является наличие полиморфного превращения, которое способно значительно изменить структуру и механические свойства титановых сплавов при сварке, а также структуры строения зоны термического воздействия.

Наличие у сплавов титана высокотемпературной модификации твёрдого раствора  $\beta$ , способной к значительному переохлаждению, позволяет получать различные структуры в зависимости от режимов термообработки.

Полиморфное  $\beta \rightarrow \alpha$  превращение может иметь два абсолютно отличительных друг от друга механизма.

При малом переохлаждении относительно равновесной температуры  $\beta \leftrightarrow \alpha$  перехода, превращение происходит естественным диффузионным путём, а при значительном переохлаждении, а значит, и при низкой температуре, когда подвижность атомов мала – по бездиффузионному мартенситному механизму. В первом случае образуется полиэдрическая структура  $\alpha$ -твёрдого раствора, а во втором игольчатая пластинчатая мартенситная структура  $\alpha'$ , которая лишь незначительно отличается по свойствам от исходной  $\beta$ -фазы [5].

Легирующие элементы, которые значительно понижают температуру  $\beta \leftrightarrow \alpha$  превращения, способствуют получению мартенсита, в то время как при небольшом легировании для этого требуется интенсивное охлаждение.

Для сплавов, образующих непрерывные с титаном твёрдые растворы и снижающих температуру  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращения, превращения  $\alpha \leftrightarrow \beta$  при медленном охлаждении реализуются по диффузионному механизму, а при быстром по мартенситному.

Кристаллическая структура  $\alpha$  и  $\alpha'$  практически идентична (гексагональная плотноупакованная решётка), но превращения при низкой температуре приводят к искажению  $\alpha$ -решётки и снижению её пластичности.

Превращение  $\beta$ -фазы определяется степенью переохлаждения, а соответственно характер превращения можно описать диаграммами изотермического распада  $\beta$ -фазы (рисунок 5) [6].

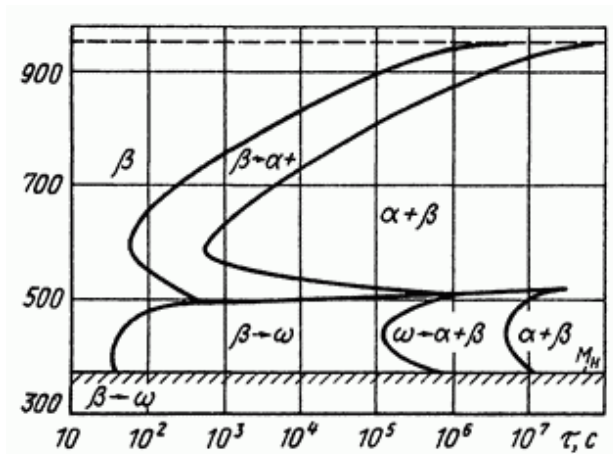


Рисунок 5- Диаграмма изотермического превращения  $\beta$ -фазы

При высокой температуре идёт  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращение по диффузионному механизму, пока не установится равновесное двухфазное состояние ( $\alpha + \beta$ ); при низкой температуре  $\beta$ - фаза превращается в  $\alpha'$ -фазу - мартенсит, в среднем интервале температур - через промежуточную  $\omega$ -фазу, которая является хрупкой и обладает плохими механическими свойствами.

Сварной шов состоит из двух различных зон: зоны сварного шва и зоны термического воздействия. Во время сварки, когда в зоне сварного шва металл нагревается до температуры плавления, начинаются процессы роста зёрен, появления химической, физической и структурной неоднородности, насыщение металла газами, появление метастабильных фаз, все эти процессы значительно влияют на свойства металла, и существенно изменяют их относительно металла до сварки. Впоследствии затвердевания металла, в сварном шве образуется литая структура [5].

В титановых сплавах мартенситного типа, к которым относится исследуемый сплав ВТ6,  $\beta \rightarrow \alpha'$  превращение происходит при более низких температурах. Температурный диапазон превращения расширяется с увеличением легирующих элементов и возрастанием скорости охлаждения.



Структура околошовной зоны представляет собой мартенситную игольчатую  $\alpha'$ - фазу на фоне остаточной  $\beta$ - фазы, количество которой с увеличением скорости охлаждения возрастает [5].

Как уже было сказано, для получения качественного, прочного и однородного сварного соединения процесса одной лазерной сварки недостаточно. Особенно это касается титановых сплавов мартенситного типа, так как сварка данных металлов может вызвать распад метастабильных фаз под действием напряжений и температуры, а это приведёт к падению пластичности в процессе дисперсионного затвердевания. Поэтому очень важно применения дополнительных финишных обработок, которые будут способны снять сварочные напряжения и стабилизировать структуры.

## **1.4 Методы повышения усталостной долговечности сварных соединений**

### **1.4.1 Ультразвуковая ударная обработка**

Традиционно для повышения усталостной прочности сварных соединений используются дополнительные виды механической обработки. Одним из широко применяемых методов повышения усталостной долговечности является ультразвуковая ударная обработка.

Упрочнение при помощи ультразвука приобрело новые возможности, когда были изучены и представлены способы передачи энергии ультразвуковых колебаний материалу по промежуточному деформирующему элементу, который размещался между торцом концентратора и обрабатываемой поверхностью в небольшом пространстве и совершал интенсивные вынужденные колебания с частотой порядка 1–3 кГц.

Звуковые колебания – это упругие волны, которые способны распространяться с определенной скоростью в любой материальной среде: твердых телах, жидкостях, газах. Частотный диапазон звуковых колебаний располагается в пределах  $10^{-2} \sim 10^{13}$  Гц. Нижним пределом ультразвука обычно считается частота  $\sim 18$  кГц. Ультразвук оказывает влияние на процесс пластической деформации, это объясняется тем, что он способен воздействовать на свойства и структуру деформируемого металла, а также на изменение схемы напряженного состояния. Ультразвуковое усиление механической обработки твердых тел сопровождается множеством сложных физических явлений, которые в зависимости от диапазона их проявления сводятся к двум группам. Первая из них связана с явлением, возникающим в объеме обрабатываемой заготовки и зависящие от действия ультразвуковых деформаций. В частности, с ультразвуковым облучением твердых тел связаны два нелинейных эффекта: акустическое разупрочнение и акустическое упрочнение. Первый эффект проявляется в процессе интенсивного

ультразвукового воздействия на материал и заключается в снижении статического напряжения, необходимого для возникновения пластической деформации.

Акустическое упрочнение металла достигается при воздействии ультразвуковых волн достаточно высокой интенсивности и проявляется в повышении их прочностных параметров (предела текучести, микротвердости, прочности, скорости ползучести и т.д.). Ко второй группе относятся явления, вызванные локальным воздействием вибрационного инструмента на обрабатываемую поверхность. Это пластическая деформация или хрупкое разрушение поверхностных слоев; изменение сил трения на границе раздела инструмент-изделие; нагрев и повышение температуры на границе двух колеблющихся частей – предельные потери акустической энергии.

В данном источнике авторы [7] сопоставляют вопрос повышения усталостной прочности с измельчением структуры после ультразвуковой ударной обработки. Автор считает, что наблюдаемые структурные неоднородности разделяют макроскопическое силовое поле в образце на локальные напряжения. Увеличение числа таких неоднородностей и уменьшение их размеров должно привести к уменьшению среднего напряжения. Благодаря ультразвуковой ударной обработки большинство концентраторов напряжений при измельчении структуры залечивается, в то время как образуется большое количество новых, менее опасных локальных напряжений, разброс между которыми понижается. Образование нанозерен приводит к изменению механизма деформации, при котором скольжение дислокаций и накопление точечных дефектов уже не играют решающей роли при накоплении усталостных повреждений. Скользящие границы зерен, которые присущи наноструктурам, способствуют затруднению образования микротрещин. Однако следует учитывать, что распространение трещин в наноструктурированных материалах происходит быстрее. Здесь небольшая толщина слоя, деформированного в результате ультразвуковой ударной обработки, должна сыграть положительную роль.

### **1.4.2 Электропластическая деформация металлов**

Электропластическая деформация металлов происходит при воздействии импульсного тока при любом виде обработки металлов давлением, связанном с пластической деформацией. Заготовка должна находиться под действием механических напряжений выше предела текучести металла [8].

Электропластический эффект во время обработки металла давлением проявляется в снижении сопротивления металла деформированию на 25-30%, увеличению его пластичности, улучшению структуры, текстуры и фазового состава материала.

При электропластической деформации из-за действия импульсного тока происходит, можно сказать, мгновенное выделение мощности в зоне деформации, что способствует достижению указанных выше технологически важных результатов.

### **1.4.3 Модифицирование сварного шва нанодисперсными тугоплавкими частицами**

Модифицирование сварных швов с использованием нанодисперсных тугоплавких частиц, редкоземельных химических элементов, или модифицирование сплавов наноразмерными порошковыми материалами с целью изменения химического состава и управление микроструктурой сварного шва и повышению прочностных свойств вызывает в последнее время большой интерес. Механизм экзогенного наномодифицирования заключается в введении в расплав специально подготовленных порошков, которые состоят из тугоплавких частиц размером менее 100 мкм. При высокой смачиваемости эти частицы равномерно распределяются в объеме жидкого металла, и когда расплав остывает, они становятся центрами кристаллизации. В результате структурные компоненты сплава измельчаются, что, в свою очередь, влияет на

свойства затвердевшего металла. Имеются многочисленные исследования по влиянию этих методов модификации на структуру и свойства отливок из высокотемпературных никелевых сплавов, сплавов на основе железа, алюминия и титана [9].

При вводе в сварочную ванну жидкого металла специально подготовленных наноразмерных тугоплавких частиц существенно улучшается кристаллическая структура шва и механические свойства сварных соединений титановых сплавов.

Дроздова В.О. [10], провёл исследования влияния физико-механических воздействий на структуру и свойства шва при лазерной сварке металлов и установил, что применение наномодифицирования позволяет повысить скорость сварке титановых сплавов при стандартных параметрах, за счёт увеличения коэффициента поглощения интенсивности лазерного излучения в начальный момент плавления металла. Это значительно повышает механические свойства и улучшает качество соединения.

Применение наномодифицирующих добавок существенно изменяет морфологию швов и измельчает макроструктуру затвердевшего металла в сварном шве, что приводит к увеличению твёрдости сварного шва. Так же из исследований Дроздова В.О. можно сделать вывод, что прочность модифицированных образцов возрастает в 1,5- 2 раза, при этом разрушение модифицированных образцов происходит по основному металлу.

## 2. Материалы и методы исследования

### 2.1. Материал исследования

Исследования данной работы проводились на сварочном сплаве титана ВТ6. Содержание основных легирующих элементов титанового сплава ВТ6 приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав титанового сплава ВТ6

Содержание, масс. %									
Fe	C	Si	N	Zr	Ti	Al	V	O	H
до 0,3	до 0,1	до 0,15	до 0,05	до 0,3	86,485-91,2	5,3-6,8	3,5-5,3	до 0,2	до 0,015

Согласно источнику [1] сплавы ВТ6 ( $\alpha+\beta$ )-класса являются наиболее распространенными за рубежом среди титановых сплавов. Сплав ВТ6 (до 0,3 Fe - до 0,1 C - до 0,15 Si - 3,5-5,3 V - до 0,05 N - 86,485 – 91,2 Ti - 5,3-6,8 Al - до 0,3 Zr - до 0,2 O - до 0,015 H) относится к двухфазным сплавам мартенситного и переходного типов. Этот сплав пользуется большим спросом при изготовлении крупногабаритных деталей авиационного назначения, для изготовления баллонов, работающих под внутренним давлением в широком интервале температур от 196 до 450°C, а также для других конструктивных элементов. По зарубежным данным около 50 % используемого в авиакосмической промышленности титана приходится на сплав ВТ6.

Данный сплав обладает высокими характеристиками жаропрочности, которые объясняются большим содержанием алюминия, а также тем, что в сплаве присутствует такой легирующий элемент как кремний. Сплав достаточно хорошо деформируется в горячем состоянии. Именно эти характеристики объясняют такой большой процент применения данного материала в авиакосмической промышленности.

Сварные соединения сплава класса ( $\alpha+\beta$ ) выполнены методом лазерной сварки. В учебном пособии [3] говорится о том, что лазерная сварка титановых сплавов мартенситного класса позволяет получать узкие швы с малой зоной термического воздействия без использования сложных вакуумных камер с достаточно большой скоростью, которая в разы превышает скорость дуговой сварки.

## **2.2. Методы исследования**

### **2.2.1. Оптическая микроскопия**

Исследования выполнялись на оптическом микроскопе Carl Zeiss 25 CA. Благодаря световой микроскопии данного микроскопа можно получить увеличение до 2-3 тысяч раз, цветное и подвижное изображение живого объекта, также данный микроскоп обладает возможностью получения микроизображения и длительного наблюдения одного и того же объекта, благодаря этому можно сделать оценку динамики объекта и его химии.

Ключевыми свойствами каждого микроскопа считается его разрешающая способность и контраст.

Разрешающая способность - это наименьшее расстояние, на котором находятся две точки, отображаемые микроскопом отдельно.

Контрастность изображения - это разница между яркостью изображения и его фона. Если эта разница составляет менее 3-4 %, то его невозможно обнаружить ни глазом, ни фотопластинкой. Такое изображение останется невидимым. Контраст зависит от свойств объекта, изменяющего поток света по сравнению с фоном, а также от способности оптики выявлять различия в свойствах луча [11].

Возможности светового микроскопа ограничены волновой природой света. Физическими свойствами света являются длина волны, которая подразумевает под собой цвет, амплитуда волны, характеризующая яркость, фаза, плотность и направление распространения волны, все перечисленные физические свойства могут меняться в зависимости от свойств объекта. Такие отличия и используются в современных микроскопах для создания контраста.



### **2.2.2. Электронная микроскопия**

Электронно-микроскопические исследования тонкого поверхностного слоя выполнены на просвечивающих электронных микроскопах JEM 100 CX II и JEOL-2100 (ЦКП “Нанотех” ИФПМ СО РАН). В электронной микроскопии вместо света для создания изображения используется поток электронов в вакууме.

Особенностью электронных микроскопов являются их линзы, которые представлены в виде электромагнитного поля, создаваемого электромагнитными катушками.

Главным условием в работе с данными микроскопами является фиксации и специальная обработка объектов перед исследованием, так как исследуемые образцы должны находиться в глубоком вакууме.

Так же перед электронными микроскопическими исследованиями образцы стоит довести до тонкого состояния, так как поток электронов сильно поглощается объектом. Электронная микроскопия данного исследования была выполнена, на подготовленных по стандартным методикам, образцах тонкой фольги.

Электронная микроскопия пользуется успехом в исследованиях, так как разрешение таких микроскопом значительно больше, чем световых и достигает 1,5Å, это позволяет исследовать образец с увеличением в миллионы раз больше.

### **2.2.3. Исследование твёрдости**

Исследования микротвёрдости были проведены на микротвердомере ПМТ-3М. Микротвердомер ПМТ-3М обладает широким применением, так как с его помощью можно измерить твёрдость многих видов материалов, таких как металлы, сплавы, стекла, абразивы, керамика и минералы.

Механизм данного микротвердомера представляет собой вдавливание алмазной пирамидки под выбранной определённой нагрузкой в исследуемый объект. После вдавливания на образце образуется отпечаток, диагональ которого измеряется при помощи линейной величины.

Чтобы определить микротвёрдость образца нужно нормальную нагрузку  $P$ , которая прилагается к алмазной пирамидке, разделить на условную площадь боковой поверхности отпечатка  $S$ :

$$H = \frac{P}{S}.$$

Как уже было сказано выше при помощи данного микротвердомера можно измерить микротвёрдость различных материалов, это объясняется его возможностью использования дополнительных сменных наконечников. Для тонких поверхностных слоёв и особо хрупких материалов используют четырехгранную пирамиду Кнуппа, а для измерения твёрдых тел трехгранную пирамиду Берковича.

Диагональ отпечатков измеряется при помощи винтового окулярного микрометра МОВ-1-16х [12].

Наблюдать исследуемый материал можно на светлом или тёмном поле.

С техническими характеристиками микротвердомера, на котором выполнялись исследования, можно ознакомиться в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики микротвердомера ПМТ-3М

Диапазон нагрузки, Н	От 0,0196 до 4,9
Диапазон нагрузки, КГС	От 0,002 до 0,500
Увеличение микроскопа микротвердомера	130, 500, 800
Габаритные размеры, мм (не более)	270х290х470
Масса, кг (не более)	22

Благодаря алмазному наконечнику микротвердомер ПМТ-3М обладает очень высокой точностью измерений, погрешность максимум составляет 2%.

### **2.2.3. Механические испытания**

Механические испытания выполнены на универсальной испытательной машине “Instron-5582”.

Диапазон нагружения данного оборудования: 2Н–100кН, скорость нагружения: 0.05 – 500 мм/мин. Температуры: -70°C to - 300°C.

При механических испытаниях на растяжение, образец материала закрепляется при помощи захватов, и растягивается вдоль продольной оси.

Скорость при испытании не изменяется, для измерения нагрузки используют специальный датчик. Данное испытание проводится для измерения удлинения, соответствующего прилагаемой нагрузке. Удлинение может быть определено несколькими способами, например, по пути движения подвижной траверсы, или путем прикрепления к материалу тензодатчика. По полученным данным можно построить кривую напряжение – деформация.

Испытания на усталость были проведены на универсальной испытательной машине «Schенck Sinus.100.40».

С помощью усталостных испытаний можно определить, как ведёт себя материал при воздействии переменных нагрузок. Некоторая выбранная средняя нагрузка и альтернативная нагрузка прилагаются к образцу, фиксируется число циклов, которое приводит образец к началу разрушения, тем самым данное число циклов характеризует выносливость.

По полученным данным можно построить диаграмму усталости, которая представляет график, указывающий число циклов, приводящих образец к разрушению против амплитуды достигнутого циклического напряжения. Каждая кривая на диаграмме представляет постоянное среднее напряжение.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА**  
**«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И**  
**РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4Б61	Насоновская Альбина Владимировна

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	23.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования.
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)	Расчет бюджетной стоимости НИ по разработке стенда
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Вадимовна	К.Т.Н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б61	Насоновская Альбина Владимировна		

#### **4. Финансовый менеджмент**

Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Помимо превышения технических параметров над предыдущими разработками необходимо понимать коммерческую привлекательность научного исследования.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

Оценка коммерческого потенциала разработки.

Планирование научно-исследовательской работы;

Расчет бюджета научно-исследовательской работы;

Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Основной целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Цель работы – разработка технологии, повышающей механические свойства сварного соединения титанового сплава ВТ6 для применения в авиастроение.

##### **4.1 Анализ конкурентных технических решений**

В качестве основных конкурентных технических решений были выбраны следующие технологии:

- сварные соединения титанового сплава, полученные путём лазерной сварки с ультразвуковой ударной обработкой и электропластической деформацией (данная работа) (1),

- сварные соединения титанового сплава, полученные путём лазерной сварки с ультразвуковой ударной обработкой (2).

Сравнение конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку эффективности научного исследования и определить направления для ее повышения. Более целесообразно проводить анализ с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 6, критерии для сравнения подбираются исходя из выбранных технологий с учетом их экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее низкая оценка, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 1	Вар. 2
1	2	3	4	5	6
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
Энергоэкономичность	0,3	5	4	1,5	1,2
Простота в эксплуатации	0,05	5	4	0,25	0,20
Надёжность	0,1	5	4	0,5	0,4
Функциональная мощность	0,2	5	3	1,0	0,6
Стойкость инструмента, высокий срок эксплуатации оборудования	0,1	5	4	0,5	0,4
Повышение производительности труда пользователя	0,2	5	5	1,0	1,0
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
Конкурентоспособность технологии	0,05	5	4	0,25	0,20
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>35</b>	<b>28</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>

Критерий «функциональная мощность» отражает наличие, либо отсутствие дополнительных возможностей.

Под «простотой эксплуатации» понимается то, насколько быстрее и проще проходит данный процесс для получения требуемых свойств материала, что так же снижает требования к уровню квалификации привлекаемого персонала.

Под «надежностью» подразумевается уровень дефектности получаемого продукта, повышение надежности достигается за счет снижения дефектности, а так же за счет отмены дополнительной обработки.

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 3 = 0,3,$$

где  $K$  – конкурентоспособность проекта;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл показателя.

Проведенный анализ конкурентных технических методов показал, что вариант технического решения №1 является наиболее предпочтительным и является наиболее эффективным методом улучшения качества сварных соединений титанового сплава.

## 4.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для определения и описания сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз.

Таблица 7 – SWOT-анализ

	<b>Strengths (сильные стороны)</b> S1. Повышение эффективности производственных процессов; S2. Снижение энергозатрат; S3. Улучшение качества металлургической продукции; S4. Повышение стойкости обрабатывающего инструмента и долговечности оборудования; S5. Широкие возможности по масштабированию проекта.	<b>Weaknesses (слабые стороны)</b> W1. Отсутствие четких режимов для проведения данной технологии; W2. Отсутствие необходимого оборудования для получения желанного эффекта; W3. Малое количество предприятий по распространению и применению данной технологии.
<b>Opportunities (возможности)</b> O1. Появление дополнительного спроса на новый продукт;  O2. Проектирование и изготовление нового металлообрабатывающего оборудования O3. Адаптация работы на иностранные языки.	O2S1S2S3S4 – Модернизация существующего оборудования под технологию УУО+ЭПД; O3S1S2S3S4S5 – Появление новых оптимизаций, которые в будущем можно будет легко интегрировать в данную технологию, тем самым значительно улучшая ее конкурентоспособность. O1S1S2S3S4 - Продолжение проведения исследований УУО+ЭПД при различных видах ПД металла и на других видах проводящих материалов	O1W1 – Инженерам не нужно вдаваться в подробности проведения технологии, что оптимизирует их работу.

Продолжение табл. 7



<b>Threats (угрозы)</b>  T1. Отсутствие мотивации к дальнейшему развитию проекта;  T2. Проблемы внешней политики, которые ведут к ограничению распространения проекта.	T1S1S2S3S4 – Режимы проведения технологии не всегда дают положительный результат, что требует нетривиальных методов проведения процесса и большого опыта инженера.	T1W1W3 – Огромная трудоемкость работы и большое число разнообразных ошибок при проведении технологии УУО+ЭПД. При прекращении работы проект не сможет раскрыть своего потенциала  T2W2 – Использование привычной технологии процесса потребует большой работы для увеличения масштабы проекта, что увеличит его стоимость.
--	--	--

Таблица 8 – Связь сильных сторон с возможностями

	S1	S2	S3	S4	S5
O1	+	+	+	+	-
O2	+	+	+	+	-
O3	+	+	+	+	+

Таблица 9 – Связь слабых сторон с возможностями

	W1	W2	W 3
O1	+	-	-
O2	-	-	-
O3	-	-	-
O4	-	-	-

Таблица 10 – Связь сильных сторон с угрозами

	S1	S2	S3	S4	S5
T1	+	+	+	+	-
T2	-	-	-	-	-

Таблица 11 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2	W 3
T1	+	-	+
T2	-	+	-

Таким образом, можно сделать вывод, что проект необходимо развивать, применяя наиболее новые и оптимизированные методы и

оборудование, что позволит создать наиболее конкурентоспособную разработку технологии [16].

### 4.3 Планирование научно-исследовательских работ

#### 4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования

представлен в табл. 12:

Таблица 12 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель
			Инженер
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	4	Календарное планирование работ по проекту	Руководитель
Проведение экспериментальных работ	5	Подготовка образцов к исследованиям	Инженер
	6	Выполнение ультразвуковой обработки с электропластической деформацией	Руководитель
	7	Проведение исследовательских работ (испытания материалов на физико-механические свойства, исследование структуры).	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных результатов	Инженер
	9	Визуализация (анализ результатов исследования, выводы по проделанной работе)	Руководитель
			Инженер
Оформление отчета по работе	10	Составление отчетной документации проекта	Инженер
	11	Сдача проекта	Инженер

#### 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Расчет продолжительности этапов работ осуществляется двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

В данном случае используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- Аналоговый;
- Вероятностный.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости  $t_{ожі}$  определяется по формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где  $t_{\min i}$  – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.;  $t_{\max i}$  – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{q_i},$$

Где  $q_i$  – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 13.

### 4.3.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki.рук} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где  $k_{кал}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где  $T_{кал}$  – общее количество календарных дней в году;  $T_{кал}$  – общее количество выходных дней в году;  $T_{пр}$  – общее количество праздничных дней в году.

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$t_{oji} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел.} - \text{дн.},$$

$$T_{pi} = \frac{t_{oji}}{C_i} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб.дн.}$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{\text{кал.инж}} = T_{\text{пр}} \cdot k_{\text{кал}} = 2,4 \cdot 1,48 = 3,55 \approx 4 \text{ кал.дн.}$$

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 66 - 14} = 1,28$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{\text{кал.инж}} = T_{\text{пр}} \cdot k_{\text{кал}} = 2,1 \cdot 1,28 = 2,69 \approx 3 \text{ кал.дн.}$$

Все полученные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 13.

Таблица 13 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительно сть работ в рабочих днях $t_{pi}$		Длительно сть работ в календарн ых днях $t_{ki}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожi}$ , чел-дни					
	Руково дитель	Инжен ер	Руково дитель	Инжен ер	Руково дитель	Инжен ер	Руково дитель	Инжен ер	Руково дитель	Инжен ер
Постановка задачи	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	3	-
Анализ предметной области (актуальность, цель, назначение, область применения)	3	3	6	6	4,2	4,2	2,01	2,01	3	3
Анализ технических требований к сварным соединениям титанового сплава ВТ6	4	4	7	7	5,2	5,2	2,6	2,6	4	4

Продолжение табл. 13

Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	1	1	4	4	2,2	2,2	1,1	1,1	2	2
Изучение литературы	-	16	-	19	-	17,2	-	17,2	-	26
Проведение консультаций	4	4	7	7	5,2	5,2	2,6	2,6	4	4
Подготовка образцов к исследованиям	-	1	-	3	-	1,4	-	1,4	-	2
Выполнение ультразвуковой ударной обработки с электропластической деформации металла	4	-	7	-	5,2	-	5,2	-	7	-
Проведение исследовательских работ (испытания материалов на физико-механические свойства, исследование структуры).	7	14	10	17	8,2	15,2	4,1	7,6	10	12
Обработка полученных результатов	-	23	-	26	-	24,2	-	24,2	-	36
Визуализация (анализ результатов исследования, выводы по проделанной работе)	-	5	-	8	-	6,2	-	6,2	-	9
Составление отчетной документации проекта	-	9	-	12	-	10,2	-	10,2	-	15
Сдача проекта	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2

После расчета и сведения в таблицу временных показателей проектирования, на основе полученной таблицы строится диаграмма Ганта.

Таблица 14 – Диаграмма Ганта

Название работы	Исполнитель	Длительность работ в календарных днях	Продолжительность выполнения работ													
			Февр.		Март			Апр.			Май			Июнь		
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
Постановка задачи	Руководитель	3														
Анализ предметной области (актуальность, цель, назначение, область применения)	Руководитель и инженер	3														
Анализ технических требований к сварным соединениям титанового сплава ВТ6	Руководитель и инженер	4														
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	Руководитель и инженер	2														
Изучение литературы	Инженер	26														
Проведение консультаций	Руководитель и инженер	4														
Подготовка образцов к исследованиям	Инженер	2														

Продолжение табл. 14

Выполнение обработки УУО+ЭПД	Руководитель	7														
Проведение исследовательских работ (испытания материалов на физико-механические свойства, исследование структуры).	Руководитель и инженер	12														
Обработка полученных результатов	Инженер	36														
Визуализация (анализ результатов исследования, выводы по проделанной работе)	Инженер	9														
Составление отчетной документации проекта	Инженер	15														
Сдача проекта	Инженер	2														

Руководитель -



Инженер-





Таблица 15 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	125
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	115
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	35

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера.

#### 4.4 Бюджет научного исследования

##### 4.4.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 16.

Таблица 16 – Сырье, материалы и комплектующие изделия

Наименование	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Заготовки (ВТ6)	0,5 кг	236	118
Шлифовальная бумага	5 шт.	9	45
Полировальное сукно	2 шт.	80	160
Алмазная паста	20 гр.	4	80
Халат	1 шт.	1000	1000

Продолжение табл. 16

Кислоты для травления	200мл.	0,053	10,6
Медицинские перчатки	2 шт.	32	64
Итого:	1383,6		

#### 4.4.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Для проведения научно-исследовательской работы требуются следующие виды оборудования: прокатный стан, генератор мощных импульсов тока, станок полировально-шлифовальный, оптический микроскоп «Axiovert», микротвердомер ПМТ – 3, универсальная испытательная машина «Instron – 5582», растровый электронный микроскоп «Tesla BS – 300», дифрактометр «ДРОН 4», стереоскоп «Zeiss Stemi 2000-C», компьютер и принтер.

#### 4.4.3 Расчет амортизации специального оборудования

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Таблица 17 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Универсальная испытательная машина Instron -5582	1	10	4 206 600	4 206 600
2	Прокатный стан	1	10	1 000 000	1 000 000
3	Оптический микроскоп Axiovert	1	10	1 150 600	1 150 600

Продолжение табл.17

4	Растровый электронный микроскоп Tesla BS - 300	1	10	694 000	694 000
5	Рентгеновский дифрактометр ДРОН – 4	1	10	4 187 000	4 187 000
6	Просвечивающий электронный микроскоп JEM-100 CX II	1	10	15 065 700	15 065 700
<b>Итого:</b>					26 303 900 руб.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m,$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Рассчитаем амортизацию для универсальной испытательной машины Instron -5582, с учётом, что срок полезного использования 10 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{10} = 0,1.$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Испытательная машина Instron -5582:

$$A = \frac{H_A I}{12} \times m = \frac{0,1 \times 4\,206\,600}{12} \times 4 = 140\,220 \text{ руб.}$$

Прокатный стан:

$$A = \frac{H_A I}{12} \times m = \frac{0,1 \times 1\,000\,000}{12} \times 4 = 33\,333 \text{ руб.}$$

Оптический микроскоп:

$$A = \frac{H_A I}{12} \times m = \frac{0,1 \times 1\,150\,600}{12} \times 4 = 38\,353 \text{ руб.}$$

Растровый электронный микроскоп:

$$A = \frac{H_A I}{12} \times m = \frac{0,1 \times 694\,000}{12} \times 4 = 23\,133 \text{ руб.}$$

Рентгеновский дифрактометр:

$$A = \frac{H_{AI}}{12} \times m = \frac{0,1 \times 4\,187\,000}{12} \times 4 = 139\,567 \text{ руб.}$$

Просвечивающий электронный микроскоп:

$$A = \frac{H_{AI}}{12} \times m = \frac{0,1 \times 15\,065\,700}{12} \times 4 = 502\,190 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 140\,220 + 33\,333 + 38\,353 + 23\,133 + 139\,567 + 502\,190 = 876\,796 \text{ руб.}$$

#### 4.4.4 Основная заработная плата

Основная заработная плата  $З_{осн}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где  $З_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (табл. 13).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_0} = \frac{58500 \cdot 10,3}{246} = 2449,39 \text{ руб.}$$

где  $З_m$  – должностной оклад работника за месяц;  $F_0$  – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (табл. 21);  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

- при отпуске в 28 раб. дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней –  $M = 10,3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_0} = \frac{18503 \cdot 11,2}{213} = 972,9 \text{ руб.}$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_{\partial}) k_p = 30000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 58500 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_{\partial}) k_p = 9489 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 18503 \text{ руб.},$$

где  $Z_{mc}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;  $k_{np}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_{\partial}$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_p$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 18 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 19 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{mc}, \text{руб.}$	$k_{np}$	$k_{\partial}$	$k_p$	$Z_m, \text{руб.}$	$Z_{\partial n}, \text{руб.}$	$T_p, \text{раб.дн.}$	$Z_{ocn}, \text{руб.}$
Руководитель	30000	0,3	0,2	1,3	58500	2449,39	35	85728,6
Инженер	9489	0,3	0,2	1,3	18503	972,9	115	111883,5
Итого:								197012,1

#### 4.4.5 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{\partial n} = k_{\partial n} \cdot Z_{ocn} = 0,15 \cdot 85728,6 = 12859,3 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_{\partial n} = k_{\partial n} \cdot Z_{ocn} = 0,15 \cdot 111883,5 = 16782,5 \text{ руб.},$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

#### 4.4.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (85728,6 + 12859,3) = 29576,4 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (111883,5 + 16782,5) = 38599,8 \text{ руб.}$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

#### 4.4.7 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как: печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

$k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,16.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 20.

Таблица 20 – Группировка затрат по статьям

Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
876 796	1383,6	197012,1	29 641,8	68 176,2	1173009,7	187681,552	1360691,252

## 4.5 Определение ресурсоэффективности исследования

### 4.5.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{32972291,6}{35000000} = 0,94$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{32972291,6}{35000000} = 0,94$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}3} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{35000000}{35000000} = 1$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

### 4.5.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент проекта;  $b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 21.

Таблица 21 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки	Бальная оценка исполнителя
1. Энергосбережение	0,3	5	4
2. Надёжность	0,1	5	4
3. Повышение производительности труда пользователя	0,2	5	5
4. Функциональная мощность	0,3	5	5
5. Простота эксплуатации	0,1	5	4
Итого:	1	5	4,4

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 = 5;$$

$$I_{p2} = 0,3 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 = 4,4;.$$



### 4.5.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Данный показатель определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{р-исп.1}}{I_{финр}} = \frac{5}{0,94} = 5,32$$

$$I_{исп.2} = \frac{I_{р-исп.2}}{I_{финр}} = \frac{4,4}{1} = 4,4$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (табл. 22). Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{ср}$ ):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} = \frac{5,32}{4,4} = 1,21$$

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.2}}{I_{исп.1}} = \frac{4,4}{5,32} = 0,83$$

Таблица 22 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Разработка	Исп.1
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,94	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	5	4,4
3	Интегральный показатель эффективности	5,32	4,4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,21	0,83

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;
2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 125 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 115 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель - 35;
3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют **1360691,252** руб;
4. По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:
  - Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,94, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;
  - Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 5, по сравнению с 4,4;
  - Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,32, по сравнению с 4,4, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.